

熱放射に関する簡易実験法（その１）

洪 谷 龍 生

この研究は、高温に熱せられた物体から放射されるエネルギーと物体の温度との関係について、簡単な装置を用いて実験することをねらいとして、実験法を考案し、検討したものである。さらに、これらの結果を利用して、学校現場において、電球のフィラメントや炎、太陽表面などの温度が測定可能であることにもふれる。

1. はじめに

我々は日常生活の中で、高温に熱せられた物体が熱や光を出す現象（熱放射または温度放射）を熱源や光源として有効に利用している。この現象は小・中・高等学校の理科教材の中においても、小学校では「豆電球と乾電池」、中学校では「恒星」、高等学校においては「スペクトル」や「恒星」の中で、物体の温度と色が、供給や放出されるエネルギーの量との関係で扱われている。これらにおける扱いは定性的であり、その限りにおいては、生徒に理解させることが特に困難であるとはいえない。

しかし、これらの関係を定量的にとらえることは高温を測定する温度計や、有効なエネルギー検知器が得られないことと放射以外の熱の流れをとらえにくい敬遠されているのが実情である。

ここでは、測定しやすさを第１のねらいとし、これらの実験法について検討し、一応の成果を得たので、その結果を報告する。上述の教材に興味、関心を持った生徒のために、また教材研究の一助として利用できるものと思う。さらに、これらの実験法を応用して、簡単に電球のフィラメントや炎、太陽表面の温度など、光高温計で測定する範囲やそれ以上の高温の概略値が測定できることにもふれる。

2. 熱放射について

高温に熱せられた物体から発散する放射線については、1900年に発表されたプランクの式から次のように説明されている。

温度 T の黒体の単位表面積から単位時間に放出される波長 λ と $\lambda + d\lambda$ の間のエネルギー E_λ は次のように表せる。

$$E_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/kT\lambda) - 1} \quad \left(\begin{array}{l} h: \text{プランクの定数} \quad c: \text{光速} \\ k: \text{ボルツマン定数} \end{array} \right) \dots\dots (1)$$

このことから、黒体の単位表面積から単位時間に放出される全エネルギー E は式(1)より次のようになる。

$$E = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15 c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4 \quad (\sigma = 5.7 \times 10^{-8} \text{ (W/m}^2 \text{ K}^4\text{)}) \dots\dots (2)$$

次に式(1)から E_λ が極値を持つとき、 $hc/kT\lambda = 4.97$ となり、放射量が極大となる波長 λ_m は

$$\lambda_m T = a \quad (a = 2.9 \times 10^{-3} \text{ [mK]}) \dots\dots\dots (3)$$

となり、温度が高いほど λ_m の値が小さくなることがわかる。

また、式(2)を可視光の領域に限定して考えると $hc > kT\lambda$ より

$$E\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \exp(-hc/kT\lambda) \dots\dots\dots (4)$$

となって、ウィーン放射式が得られる。

次に、これらの関係を確認するための、比較的、簡便な実験法について検討した結果を述べる。ここでは、使用する放射体は黒体と見なせることにする。

3. 物体の温度と放射される総エネルギー量の関係

(1) 原理

温度 T の黒体 A から放出されるエネルギーを検出するため、小さな黒体検出器 B をおく。検出器が放射エネルギー ΔE を受け温度が ΔT だけ上昇して落着いたとすると、室温を T_0 とすれば、B へ出入りする熱量は平衡に達しているので

$$\Delta E = \alpha \Delta T + \beta \{ (T_0 + \Delta T)^4 - T_0^4 \} = r (T^4 - T_0^4)$$

(α, β, r は定数) となる。 $T \gg T_0 + \Delta T$ のときは

$$\Delta T = (r/\alpha) \times T^4 \dots\dots\dots (5)$$

となり、B の温度変化を読み取ることにより A から放出されたエネルギー量の変化が読み取れる。

(2) 装置と方法

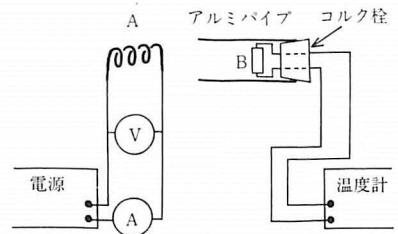
- ①簡易熱線検出器：ダイオード 1S1588 をセンサーとした温度計を用い、ダイオードにゼロックス用炭素粉を接着剤で固定し、上述の黒体検出器 B とした。温度計の出力は、 100°C を 1.000 V とし、センサーの温度変化を読み取った。
- ②放射体：自動車用電球 (12V-23W) と熱電対温度計の保護管 (外径 6mm) に電熱線を巻きつけたものを使用した。
- ③温度計：電球のフィラメント温度は光高温計で、電熱線の温度は熱電対温度計で測定した。

(3) 結果と考察

(a) 自動車用電球を使用した場合

電球表面から 5mm 離してセンサーを置いたときのフィラメントの温度と放射量の関係を図 2 に、供給電力との関係を図 3 に示した。

図 2 からフィラメントの温度が 2000 K (供給電圧 6V) 以上では検出されるエネルギーが T^4 に比例し、これより低い温度では検出量が減少していることがわかる。この減少



B: 1S1588

図 1 放射エネルギーの測定装置

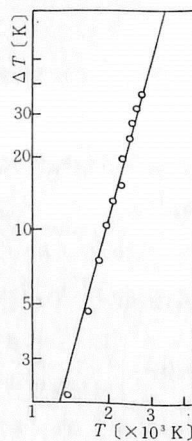


図 2 フィラメントの温度と放射量

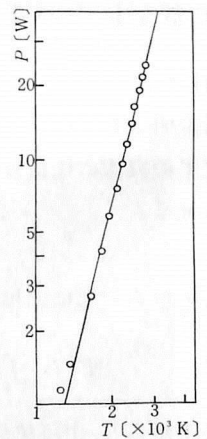


図 3 フィラメントの温度と供給電力

については次のことが考えられる。

- ① タングステンの分光放射率は温度と波長により異なり、低温度になるほど赤外の放射率が小さい。¹⁾
- ② フィラメントとセンサーの間の物質による熱伝導と対流のため検出量が小さい。
- ③ センサーの吸収率が波長に依存して変化する可能性もあるが、確認していない。

フィラメントに供給された電気エネルギー P が全て熱放射のエネルギーに変換された（または、変換率が一定である）と考えると図3で P と T^4 は比例することになる。 T が 1400 K（供給電圧 2 V）以下ではこの関係が成立せず、フィラメントの支持棒を通して熱が逃げる効果が大きく現われる。測定値から T と P の関係を求めると $P = 2.51 \times 10^{-13} T^4 + 5.32 \times 10^{-4} (T - T_0)$ となり、 $T_0 = 300$ K のとき放射に寄与しない電力が供給電力に占める割合は T が 1400 K, 2000 K に対してそれぞれ 38%, 18% となる。

以上のことから、物体の放射エネルギー E が T^4 に比例することを電球を用いて実験する場合は、フィラメント温度を十分に高くし、センサーを電球に接近させておくと良い結果が得られる。

この実験に使用する光高温計は学校現場には無いが、後述する方法で簡易高温計を自作すれば、この実験はできる。

(b) 電熱線を用いた場合

放熱体と検出器を排気鐘の中に入れ 1 mm Hg 程度の低圧で電熱線の発光が見える範囲で実験した結果を図4に示す。

測定結果から、この範囲では ΔT と T^4 は比例していて電球による実験の代替実験として利用できる。

この実験は熱電対温度計を使って電熱線の温度を直接測定できる利点があるが、電熱線や熱電対の融点を考慮すると 1300 K 付近までしか測定できない欠点もある。

大気中でこの実験をすると対流や伝導の影響を受け、検出されるエネルギーは T の 3.0 ~ 3.3 乗に比例する。

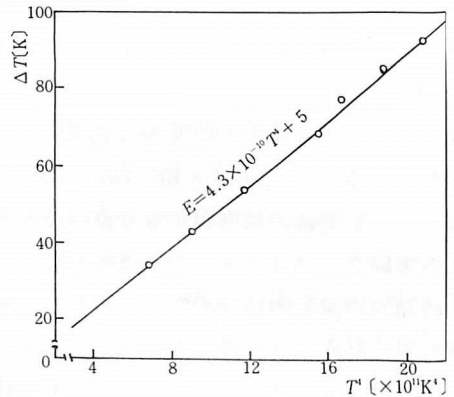


図4 電熱線の温度と放射量

4. 物体の温度と放射される光の分光強度の関係

(1) 原理

光の分光強度を直接測定するためには、高感度のボロメーターと分光透過率が正確に知られている分光器が必要であるが、任意の2つの波長についての放射強度を測定すると、その温度依存性がわかる。温度 T の黒体から放出される波長 λ_1 , λ_2 の光の放射強度比は式(4)より次のようになる。

$$\ln \left(\frac{E_2}{E_1} \right) = A + B \times \left(\frac{1}{T} \right) \quad \dots\dots (7)$$

但し

$$A = \ln \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^{-5} \quad B = \frac{ch}{k} \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \quad \dots\dots (8)$$

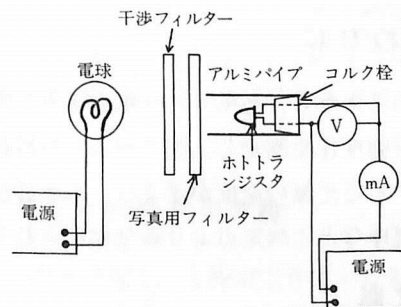


図5 光の分光強度測定装置

(2) 装置と方法

測定装置の概要を図 5 に示した。

①フィルター：干渉フィルターとカメラ用フィルターを組み合わせて波長 750 nm, 680 nm の単色光 (半値幅 14 nm, 透過率約 30%) をたる。

②光量検出装置：ホトトランジスタ TPS601 の両極に一定電圧 3.0 V を加え、その光電流から光量の大きさを求めた。このホトトランジスタは上述の 2 つの波長に対する相対分光感度が 98% と 80% であり、光電流は 10 mA 以下では光量に比例している。²⁾

(3) 結果と考察

電球のフィラメントについて測定した結果を図 6 に示した。グラフから放射強度の比が $1/T$ に依存すること。温度が高いほど波長が短い光の放射量の増し方が大きくなることがわかる。

また、グラフの傾きと切片から式(8)を使って 2 つの光の波長を求めると $\lambda_1 = 6.8 \times 10^{-7} \text{ [m]}$, $\lambda_2 = 7.6 \times 10^{-7} \text{ [m]}$ となり、この実験の精度がかなり良いことになる。

この実験で、フィルターの透過光の幅が広い場合にも、その透過光の波長領域がずれていると、一般には、式(7)の関係が見られる。赤と青のセロハン紙をスライドのマウントにはさみフィルターとして用いたときの結果を図 7 に示した。良い結果が得られるが、セロハン紙のわずかなよごれや折れ目などによる透過率の差が実験精度を悪くする。

図 7 から、温度が上がると赤セロハン紙の方が透過エネルギーが多くなるが、これは、赤セロハン紙は 600 nm 付近、青セロハン紙は 700 nm 付近より長い波長の光を多く通し、その効果が現れるためである。

5. おわりに

上述のことから、色セロハン紙とホトトランジスタで簡易高温計ができる。電球や炎などの既知の温度で放射強度比を測定し、図 7 のような較正用グラフを作る。次に、他の熱放射による光の分光強度比を測定すると光源の温度が求まる。この方法では光高温計で測定不可能な太陽表面の温度も、グラフの直線を電球などの測定点より高温側に延長することにより、放射強度比の測定値から概略の値が求まる。

参考文献

- 1) 久保田広他編：光学技術ハンドブック，朝倉書店，337，（1970）
- 2) 東芝：半導体技術資料，TPS 601

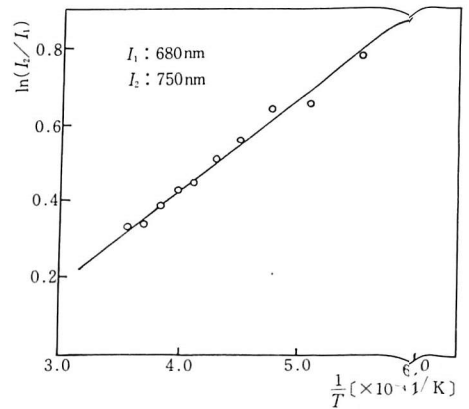


図 6 分光放射強度比と温度との関係

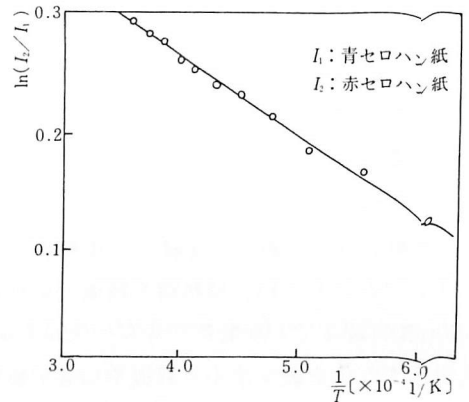


図 7 色セロハン紙をフィルターとしたときの分光放射強度比と温度との関係